بررسی آزمایشگاهی اثر قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای به کمک دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه*

علی احمدی[۱] سید احسان سیدی حسینی نیا[۲]

چکیده *این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر قوس‌زدگی به‌صورت ایجاد ساختاری به شکل قوس پایدار در مصالح دانه‌ای پرداخته است. بدین منظور یک دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه ساخته شده و به‌کمک آن ابعاد قوس ایجاد شده در مصالح دانه‌ای برحسب زاویهٔ اصطکاک داخلی، قطر متوسط و زاویهٔ قرارگیری بستر مصالح مورد پژوهش قرار گرفته است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که برای همهٔ مصالح مورد آزمایش با افزایش عرض دریچه و کاهش زاویهٔ قرارگیری بستر مصالح دانه‌ای، عرض و ارتفاع قوس تشکیل شده افزایش می‌یابد و شکل تمامی قوس‌ها به‌صورت یک سهمی است. از طرفی به‌ازای یک عرض دریچه و زاویهٔ بستر ثابت، با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی و چگالی مصالح دانه‌ای، ارتفاع و عرض قوس افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی قوس‌زدگی؛ مصالح دانه‌ای؛ دریچه؛ زاویهٔ بستر؛ شکل قوس.

Experimental Investigation on the Arching Effect in Granular Materials by Using the Developed Trapdoor Apparatus

A. Ahmadi S. E. Seyedi Hosseininia

Abstract *This paper discusses the arching effect as the formation of a stable arch in granular materials. For this aim, a developed trapdoor apparatus is designed in order to investigate the arch dimensions in term of the internal friction angle, average size and base angle of materials. Observations show that for all tested granular ensembles, width and height of the arch increase with an increase in trapdoor width and a decrease in base angle. It is also found that the shape of the whole arches is governed by a parabola. In addition, for both constant values of trapdoor width and base angle, the increase in both the internal friction angle and density of granular materials leads to the increase in arch dimensions.*

Keywords Arching; Granular Materials; Trapdoor; Base angle; Arch width; Arch height.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۰/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۴/۲ می‌باشد.

(۱) دانش آموختهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲)نویسنده مسئول: استادیار، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

پدیدهٔ قوس‌زدگی (arching) یکی از متداول‌ترین پدیده‌های موجود در مصالح دانه‌ای است. ترزاقی [1] قوس‌زدگی را به‌صورت انتقال فشار از یک توده خاک به بخش‌های پایدار مجاور تعریف کرد که ناشی از بسیج‌شدگی مقاومت برشی بین ذرات است که درواقع حاصل جابه‌جایی نسبی ذرات در مصالح دانه‌ای می‌باشد. او با ابداع دستگاه آزمایش دریچه (trapdoor apparatus) به تفسیر اثر قوس‌زدگی به‌معنای انتقال فشار پرداخت. با بهره‌گیری از این ایده، پژوهش‌های بسیاری برای شناخت اثر قوس‌زدگی در مسائل گوناگون مهندسی از جمله انتقال بار در سازهٔ دیوار نگهبان [2]، تحلیل و طراحی تونل‌ها [7-3]، مقاومت باربری شمع‌ها [8]، نشست خاکریزهای متکی به شمع [9]، بار موجود بر روی سازه‌های زیرزمینی و مدفون در خاک [12-10] و جریان دانه‌ای در قیف‌ها و سیلوها [13] انجام شده است. برای آشنایی بیشتر با پدیدهٔ قوس‌زدگی مطالعهٔ مرجع [14] پیشنهاد می‌شود. در تمامی موارد ذکرشده، به‌دلیل آن‌که منطقهٔ تحت تأثیر انتقال فشار به‌شکل یک قوس یا کمان می‌باشد، نام قوس‌زدگی برای این پدیده انتخاب شده است. با این وجود، اثر قوس‌زدگی به‌معنای ایجاد ساختاری پایدار به‌صورت یک قوس نیز قابل تعریف است. برای نشان دادن این مفهوم در مصالح دانه‌ای، گو و ژو [15] با اصلاح دستگاه دریچهٔ ترزاقی، دستگاهی طراحی کردند که می‌توانست امکان تشکیل قوس در برخی از مصالح دانه‌ای را مدل‌سازی کند. قرارگیری بستر مصالح فقط بر روی زاویهٔ ۳۰ درجه نسبت به افق و استفاده از تعدادی دریچه با عرض ثابت، جزو محدودیت‌های این دستگاه شمرده می‌شود. با بهره‌گیری از این ایده و برای رفع این محدودیت‌ها، یک دستگاه طراحی و ساخته شده است که می‌تواند امکان تشکیل قوس در مصالح دانه‌ای گوناگون دارای ذراتی با قطرهای دلخواه را فراهم نماید. از سوی دیگر، بستر مصالح در این دستگاه بر روی کلیهٔ زوایا شامل صفر تا ۹۰ درجه نسبت به افق قابل تنظیم است و دریچه‌ای متحرک با قابلیت باز شدن تا میزان دلخواه دارد. با استفاده از این دستگاه می‌توان حداکثر عرض دریچه را که بر روی آن قوس‌زدگی ایجاد می‌شود، به‌دست آورد.

در ارائهٔ این مقاله، باکمک نتایج حاصل از انجام چندین آزمون بر روی مصالح دانه‌ای با دستگاه ساخته شده، ارتباط ابعاد قوس ایجاد شده به‌ازای عرض دریچه و زاویهٔ بستر مصالح دانه‌ای نسبت به افق بررسی می‌شود. هم‌چنین، سعی بر آن است تا پارامترهای مؤثر در قوس‌زدگی شناخته شوند و رابطه‌ای برای توصیف شکل هندسی ناحیهٔ قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای به‌دست آید.

آشنایی با آزمون دریچه و علت انتخاب این روش

یکی از روش‌های بررسی اثر قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای، استفاده از آزمون آزمایشگاهی دریچه است. هدف اصلی این آزمون که نخستین بار توسط ترزاقی [16] ابداع شد، مطالعه بر روی قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای به‌عنوان ماهیت انتقال فشار در مصالح تشکیل‌دهندهٔ محیط می‌باشد. شکل ناحیه‌ای از محیط دانه‌ای که در آن تودهٔ مصالح تحت انتقال فشار قرار گرفته‌اند، شبیه به یک قوس است و نام قوس‌زدگی برای این پدیده انتخاب شده است. در هیچ یک از این آزمایش‌ها که با هدف بررسی اثر قوس‌زدگی به‌عنوان انتقال فشار در تودهٔ مصالح دانه‌ای انجام شده، دریچه به‌طور کامل برداشته نشده است. نخستین بار گو و ژو [۱۵] با برداشتن کامل دریچه به مطالعهٔ قوس‌زدگی در حالت کرنش مستوی پرداختند و توانستند تعریف جدیدی برای پدیدهٔ قوس‌زدگی ارائه نمایند. مطابق تعریف [15] قوس‌زدگی عبارت است از تشکیل یک ساختار پایدار قوسی‌شکل خودایستا در مصالح به‌نحوی که این قوس دارای یک سطح آزاد از تنش باشد. به بیان دیگر، هیچ‌گونه تکیه‌گاه خارجی این قوس را تحمل نمی‌کند. در

دستگاه ساخته شده، بستر نگهداری مصالح دانه‌ای به‌جای حالت قائم، دارای زاویهٔ ۳۰ درجه نسبت به افق است. این آزمون، فقط برای چند عرض ثابت دریچه انجام شده است. بنابراین باید این موارد را جزو محدودیت‌های دستگاه [15] دانست. در این تحقیق به‌منظور اصلاح و توسعهٔ کاربرد آزمون دریچه، اسبابی به نام «دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه» (Developed trapdoor apparatus) طراحی و ساخته شده است که دارای سه ویژگی‌متمایز نسبت به سایر دستگاه‌های آزمون دریچه است که در حال حاضر در جهان موجود می‌باشد؛ ۱) زاویهٔ بستر نگهداری مصالح دانه‌ای می‌تواند در بازهٔ زاویهٔ صفر تا ۹۰ درجه نسبت به افق تنظیم گردد. ۲) عرض دریچه بین صفر تا ۳۰ سانتی‌متر می‌تواند تنظیم شود. ۳) ضخامت جعبهٔ نگهداری مصالح باتوجه به قطر ذرات مصالح دانه‌ای قابل تنظیم است. بنابراین، استفاده از این دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه می‌تواند سبب شناخت بهتر پدیدهٔ قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای گردد.

ساختار دستگاه توسعه یافتهٔ آزمون دریچه

بخش‌های اصلی دستگاه آزمون دریچه شامل یک جعبه به‌عنوان مخزن نگهداری مصالح و یک بازشو با عرضی کوچک‌تر از عرض جعبه هستند. هدف از ساخت این دستگاه، توسعهٔ دستگاه آزمون دریچهٔ [15] موجود بود. طراحی و ساخت هر قطعه به‌همراه جزئیات آن به‌شرح زیر انجام شده است.

بستر اصلی دستگاه. تمامی قطعات مورد استفاده برای آماده‌سازی شرایط آزمون دریچه، بر روی یک تخته از جنس چوب ملامینه به ابعاد ۴۰ × ۶۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر نصب می‌شوند. این قطعات شامل موارد زیر هستند:

– شیشهٔ ضدضربه: شیشه مقاوم ضدضربه که به‌عنوان لایهٔ محافظ فوقانی جعبهٔ نگهداری مصالح مورد استفاده قرار می‌گیرد.

– شانهٔ جانبی: دو قطعهٔ چوبی قائم مکعب مستطیل شکل به ابعاد ۳/۵ × ۵ × ۴۱/۵ سانتی‌متر که دارای شیاری به اندازهٔ ضخامت شیشهٔ ضدضربه هستند.

– مخزن مصالح تخلیه‌شده: مصالح پس از تخلیه درون آن وارد شده و در محیط پیرامون دستگاه پراکنده نمی‌شوند.

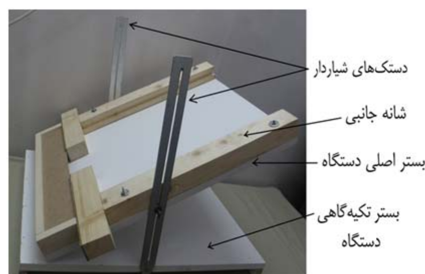
– ریل‌های افقی: دو قطعهٔ چوبی افقی مدرج به ابعاد ۳/۵ × ۵/۳ × ۱۹/۸ سانتی‌متر که دقیقاً در تراز بین دو شانهٔ جانبی و مخزن مصالح تخلیه شده قرار می‌گیرند.

– جعبهٔ نگهداری مصالح دانه‌ای: این جعبه در حقیقت فضای محدود به تخته چوب ملامینه (بستر اصلی دستگاه) از رویهٔ تحتانی، شیشهٔ ضدضربه از رویهٔ فوقانی، دو قطعه شانهٔ جانبی از طرفین، دو ریل افقی از پایین می‌باشد که از سمت بالایی برای ورود مصالح کاملاً باز است. اندازهٔ ضخامت درونی جعبه برابر با قطر متوسط ذرات تشکیل‌دهندهٔ مصالح دانه‌ای (d_{50}) به‌علاوهٔ یک میلی‌متر فاصلهٔ جدایش برای به حداقل رساندن اصطکاک مصالح دانه‌ای با بستر اصلی و شیشهٔ ضدضربه است.

بستر تکیه‌گاهی دستگاه. این قطعه که تحمل بار کل حاصل از بستر اصلی دستگاه را بر عهده دارد، یک تختهٔ چوبی از جنس ملامینه به ابعاد ۴۰ × ۶۵ سانتی‌متر است که بر روی دو پایهٔ چوبی نصب شده است. بستر اصلی دستگاه از طریق یک قطعه لولای فولادی پنج‌سوراخه به ابعاد ۱/۳ × ۳۰ سانتی‌متر متصل شده است. از طرفی وزن مجموعهٔ تعبیه‌شده بر روی بستر اصلی، به‌وسیلهٔ دو قطعهٔ فولادی به نام دستک شیاردار به بستر تکیه‌گاهی انتقال می‌یابد. جزئیات این قطعات فولادی در ادامه بیان شده است.

دستک‌های شیاردار. این دستک‌ها برای متحرک نمودن بستر اصلی دستگاه تعبیه شده‌اند. هر دستک از طریق یک سوراخ، بر روی بستر تکیه‌گاهی به‌طور ثابت

پیچ شده است. بر روی هر پهلوی بستر اصلی، یک پیچ و مهره نصب شده است که داخل شیار مذکور قرار می‌گیرند و می‌توانند با حرکت درون این شیارها، بستر اصلی را بر روی هر زاویهٔ دلخواهی نسبت به افق تنظیم نمایند. پس از آنکه بستر اصلی بر روی زاویهٔ دلخواه مستقر شد، مهره‌ها بسته می‌شوند تا بستر اصلی کاملاً در شیار قفل گردد و بر روی آن زاویه تثبیت شود.
شکل (۱) نمای جانبی از دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه و شکل (۲) نمای روبه‌رو از دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه را نشان می‌دهند.



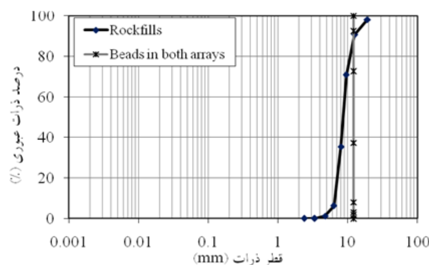
شکل ۱ نمای جانبی از دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه



شکل ۲ نمای روبه‌رو از دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه

مصالح دانه‌ای مصرفی

مصالح دانه‌ای مورد استفاده در این آزمون شامل گوی-های پلاستیکی و مجموعه‌ای از سنگریزه‌ها هستند که شکل(۳) منحنی دانه‌بندی آنها را نشان می‌دهد. برطبق شکل (۳) مقدار d_{50} برای گوی‌های پلاستیکی و مجموعه سنگریزه‌ها به‌ترتیب برابر ۱۲ میلی‌متر و ۹ میلی‌متر است.



شکل ۳ منحنی دانه‌بندی مصالح دانه‌ای مورد استفاده

مجموعه گوی‌های پلاستیکی. گوی‌های پلاستیکی مجموعه‌ای از دانه‌های تسبیح با شکل هندسی بسیار نزدیک به کره هستند. هدف اصلی از انتخاب گوی‌های پلاستیکی بررسی و مقایسهٔ اثر اندازه، جنس، چگالی، زاویهٔ اصطکاک داخلی، نحوهٔ آرایش یا چیدمان این ذرات با گوی‌های شیشه‌ای و ذرات Z_rO_2 مورد استفاده در آزمون [15] به‌عنوان تفاوت‌های این دو آزمون است. قطر تمام دانه‌ها ۱۲ میلی‌متر است. برای استفاده از این مصالح و داشتن حالت‌های مختلف تراکمی، از چیدمان گوی‌ها در دو آرایش منظم استفاده شده است:

آرایش شل. در چیدمان آرایش شل ابتدا دانه‌ها در اولین ردیف ریخته می‌شوند و سپس هر دانه دقیقاً روی دانهٔ ردیف زیرین گذاشته می‌شود و این روند تا پر شدن کامل جعبه ادامه می‌یابد. باید گفت که کوچک-ترین ارتعاش مانند لرزش دست هنگام قرار دادن دانه‌ها بر روی یکدیگر سبب فروریزش دانه‌ها می‌گردد و باید کل کار را از نو آغاز کرد. به همین دلیل دستیابی به این آرایش کاری بس دشوار است و نیاز به تمرکز و دقت بالایی دارد، به‌طوری که پر کردن جعبه با این آرایش حدود ۹۰ دقیقه به طول می‌انجامد. جرم چگالی (ρ) تودهٔ گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل برابر با ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست می‌آید.

با استفاده از دستورالعمل ارائه‌شده در مرجع [17] برای انجام آزمون تعیین زاویهٔ آسایش، زاویهٔ اصطکاک

داخلی (ϕ) گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل برابر ۳۰/۷ درجه اندازه‌گیری و تعیین گردیده است.

آرایش متراکم. در آرایش متراکم ابتدا دانه‌ها در اولین ردیف ریخته می‌شوند و سپس هر دانه دقیقاً بین دو دانهٔ ردیف پایینی قرار می‌گیرد و این روند تا پر شدن کامل جعبه ادامه می‌یابد. دستیابی به این آرایش نیز کاری بسیار دشوار است و نیاز به تمرکز و دقت بالایی دارد، به‌طوری که پر کردن جعبه با آرایش متراکم تقریباً نیازمند مدت زمانی در حدود ۵۰ دقیقه می‌باشد.

چگالی گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم برابر ۱/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. با انجام آزمون تعیین زاویهٔ آسایش، زاویهٔ اصطکاک داخلی گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم برابر ۳۷/۴ درجه اندازه‌گیری شده است. شکل (۴) نحوهٔ چیدمان دو آرایش شل و متراکم را برای گوی‌های پلاستیکی نشان می‌دهد.



الف) آرایش متراکم



ب) آرایش شل

شکل ٤ انواع آرایش گوی‌های پلاستیکی

مجموعهٔ سنگریزه. مجموعهٔ سنگریزه برای مقایسهٔ شباهت‌ها و تفاوت‌های آن با ماسهٔ درشت‌دانهٔ مورد استفاده در آزمون دریچه [15] انتخاب شده است. در آزمون مرجع [15] به‌دلیل استفاده از ماسه با درصد رطوبت ۲٪، چسبندگی کمی به‌خاطر اثر مویینگی ایجاد می شود، درصورتی که چنین چیزی برای سنگریزه‌ها اتفاق نمی‌افتد. قطر متوسط مجموعهٔ سنگریزه ۹ میلی‌متر است. زاویهٔ اصطکاک داخلی براساس انجام آزمون زاویهٔ آسایش معادل ٤١/٣ درجه اندازه‌گیری شده است. شکل(۵) مجموعهٔ سنگریزه‌ها را نشان می‌دهد.

روش انجام آزمایش

در آغاز با توجه به قطر مصالح دانه‌ای، ضخامت درونی جعبه را بسته به قطر مصالح تنظیم می‌کنیم. سپس، با حرکت دادن پیچ‌های متصل به بستر اصلی دستگاه در مسیر دستک‌های شیاردار و محکم کردن آنها، بستر اصلی دستگاه بر روی زاویهٔ مورد نظر نسبت به افق نصب می‌شود. دو ریل افقی به اندازهٔ قطر متوسط ذرات (d_{50}) از یکدیگر دور می‌گردند و در فاصلهٔ ایجادشده یک قطعه آکاستیو فشردهٔ مکعب مستطیلی شکل به‌عنوان درپوش (door) قرار می‌گیرد. سپس مصالح دانه‌ای وارد جعبهٔ آزمایش می‌شوند. البته نحوهٔ ریختن مصالح دانه‌ای درون جعبه متفاوت است که در ادامه تشریح می‌گردند.



شکل ۵ نمای نزدیک از مجموعهٔ سنگریزه

– ریختن گوی‌های پلاستیکی در جعبه: همان‌طور که در بخش ۱,٤ بیان گردید، دو آرایش شل و متراکم برای

گوی‌های پلاستیکی درنظر گرفته شده است. قـرار دادن دانه‌ها در جعبه مطـابق هـر یـک از ایـن دو آرایـش بـا کیفیتی که ذکر شد، کـاری بـس دشـوار اسـت. پـس از بررسی‌های فراوان، تصمیم بر آن شد کـه شیشـهٔ ضـد-ضربه توانایی جابه‌جایی به‌صورت کشویی داشته باشـد. بدین منظور، شکافی به ضخامت ۱۱ میلی‌متـر بـر روی وجه درونی شانه‌های قائم جانبی تعبیـه شـد تـا شیشـهٔ محافظ به ضخامت ۱۰ میلی‌متر بتواند بدون لق‌زدن بـه-صورت کشویی درون شـکاف وارد و خـارج شـود. بـا توجه به توضیحات فوق، بـرای قـرار دادن گـوی‌هـای پلاستیکی درون جعبه ابتدا شیشهٔ محافظ خارج می‌شود و در مرحلهٔ بعد، بستر اصلی دستگاه بر روی یک زاویهٔ مایل تنظیم می‌گردد که این امر سبب مـی‌شـود فرآینـد چیدن گوی‌ها در جعبه مطابق آرایش شـل یـا متـراکم، برای انجام‌دهندهٔ آزمایش با سـهولت بیشـتری صـورت پذیرد؛ زیرا اگر بستر دستگاه بر روی زاویـهٔ ۹۰ درجـه نسبت به افق قرار گیرد، شـتاب بیشـتری ($g\times\sin 90^\circ$) نسبت به زاویـهٔ بسـتر مایـل ماننـد زاویـهٔ ۵۰ درجـه ($g\times\sin 50^\circ$) به دانه‌ها اعمال می‌شود، بنـابراین احتمـال ریزش گوی‌های چیده‌شده در ترازهای مختلف افزایش می‌یابد و درنتیجه زحمت کـار بیشـتر خواهـد بـود. از سوی دیگر، باید تـا حـد امکـان از ایجـاد ارتعـاش بـه دستگاه جلوگیری نمود و در چیـدن گـوی‌هـا حـداکثر توان را به‌کار گرفت. با انجـام ایـن عملیـات و در نظـر گرفتن تمامی تدابیر ذکرشده می‌توان گوی‌هـا را بـا هـر یک از آرایش‌های شل یا متـراکم تـا بـالاترین تـراز در جعبه قرار داد. سرانجام پس از آن‌که جعبه کاملاً پر شد، شیشهٔ ضدضربهٔ محافظ در محل اولیهٔ خود یعنـی درون شکاف موجود روی شانه‌های جانبی نصب می‌گردد.

- ریختن سنگریزه‌ها در جعبه: قرار دادن سنگریزه‌ها در جعبهٔ آزمون با فرآیندی که برای گـوی‌هـای پلاسـتیکی شرح داده شد، متفاوت است. بدین منظور، ابتدا شیشـهٔ محافظ وارد شکاف جعبـه مـی‌شـود. در مرحلـهٔ بعـد، مصالح دانه‌ای بـا همـان جـرم ثابـت ۱۹۰۰ گـرم درون فضای جعبه ریخته می‌شوند.

پـس از قـرار دادن مصـالح دانـه‌ای درون جعبـهٔ آزمایش، سرانجام آکاستیو به طرف پایین منتقل می‌گردد و به‌طور کامل برداشته مـی‌شـود. توجـه بـه ایـن نکتـه ضروری است که برای عدم ایجاد تنش‌هـای برشـی در مصالح باید نوع حرکت دریچه به‌صورت انتقالی رو بـه پایین باشد. اگر با برداشتن درپوش، بر روی دریچه یک قوس تشکیل شـد، ایـن مرحلـه بـه‌عنـوان اولـین گـام آزمایش انتخاب می‌شود، ولی چنـان‌چـه قوسـی ایجـاد نشد، عرض دریچه هر مرتبه به‌انـدازهٔ «یـک میلـی‌متـر» افزایش داده می‌شود تا جایی که اولین قـوس‌زدگـی در مصالح پدیدار گردد. در این لحظه عرض دریچه متناظر با نخستین قوس به‌عنوان گام اول آزمایش در نظر گرفته می‌شود و اطلاعات مربوط به ابعاد قـوس قرائـت مـی-گردد. در گام دوم، دریچه بـه‌انـدازه $[d_{50}+0.2]$ (cm)، در گام سوم بـه‌انـدازهٔ $[d_{50}+0.4]$ (cm)، ... و در گـام nاُم به اندازهٔ $[d_{50}+(n-1)\times 0.2]$ (cm) باز می‌شـود و در هر گام بـه‌ازای یـک انـدازه زاویـهٔ بسـتر و عـرض دریچهٔ معین، مشخصـات ظـاهری قـوس تشـکیل‌شـده شامل عرض و ارتفاع قوس قرائت و ثبت می‌شود.

با یک دید دقیق به فرآیند آزمون می‌توان گفـت کـه بـا برداشت دریچه، تمامی مصـالح از جعبـه خـارج نمـی-شوند، بلکه پس از گذشت زمان معینی از شروع تخلیـهٔ مصالح، ذرات محیطی طوری در کنار یکدیگر قرار می-گیرند که یک قوس پایدار در روی دریچه ایجـاد مـی-شود. این قوس می‌تواند فشار حاصل از مصالح اطـراف خود را تحمل کند و آن را به دو تکیه‌گاه تحتـانی خـود انتقال دهد. علت وقوع این پدیده در مصالح دانه‌ای این است که حین خـارج شـدن مصـالح از دریچـه در اثـر برخورد ذرات با یکدیگر، بین دانه‌ها مقداری اصـطکاک ایجاد می‌شود که در نهایت سبب بسیج شـدن مقاومـت برشی بین ذرات و در نتیجه قفل‌شدگی (Interlocking) ذرات در یکدیگر می‌گردد. همین قفل‌شـدگی ناشـی از اصطکاک داخلی ذرات مصالح دانه‌ای منجـر بـه تولیـد

یک زنجیرهٔ نیرویی در یک سازهٔ پایدار قوسی‌شکل در مصالح می‌گردد که اصطلاحاً پدیدهٔ قوس‌زدگی نامیده می‌شود.

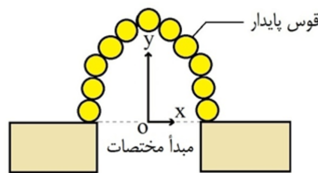
به‌ازای هر زاویهٔ بستر، این روند افزایش عرض دریچه تا آن‌جا ادامه می‌یابد که دیگر هیچ قوسی بر روی دریچه ایجاد نشود. با توجه به مطالب بیان شده، آخرین گام آزمایش، مربوط به عرضی از دریچه است که دقیقاً یک مرحله قبل از عرض دریچه مربوط به عدم تشکیل قوس می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که تا حد امکان، باید انجام آزمایش در شرایط ایده‌آل زیر صورت پذیرد:

- کنترل دقیق آرایش و چگالی مجموعه مصالح دانه‌ای
.
- کنترل صحت زاویه قرار گیری بستر اصلی نگهداری مصالح دانه‌ای .
- قرارگیری بستر تکیه‌گاهی دستگاه به‌صورت کاملاً افقی و بدون کوچک‌ترین انحراف از تراز .
- ساکن بودن کامل جعبه در حین انجام آزمایش
- پرهیز از اعمال هرگونه ارتعاش ناشی از ضربه .
- باز شدن متقارن دو ریل افقی: (برای اطمینان از حصول این شرط، باید همواره طول دو ریل افقی طرفین دریچه کاملاً با هم برابر باشد که مدرج بودن دو قطعه در این خصوص کمک می‌کند).

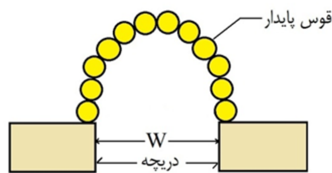
داده‌های حاصل از آزمایش

در مجموع، ۷۳٤ گام آزمایش بر روی مصالح دانه‌ای انجام شده است که ۲۷٦ آزمایش مربوط به گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل (برای ده زاویهٔ قرارگیری بستر)، ۳۱٦ گام آزمون مربوط به گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم (برای ده زاویهٔ بستر) و ١٤٢ گام آزمایش مربوط به مجموعه سنگریزه‌ها (برای چهار زاویهٔ بستر) می‌باشد. در ابتدا چند تعریف در رابطه با اطلاعات وابسته به دریچه و قوس پایدار ارائه می‌شود.

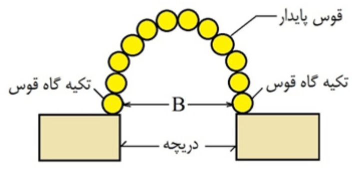
عرض دریچه. همان‌طور که در بخش ۵ به طوراجمالی بیان گردید، دریچه عبارت است از فضای خالی بین دو ریل افقی که پیش از انجام آزمون به‌وسیلهٔ یک قطعهٔ پلاستیکی فشرده به نام آکاستیو پر می‌شود و برای اجرای آزمایش این آکاستیو برداشته می‌شود. ضمناً عرض دریچه با نماد W نمایش داده می‌شود. از طرفی، عرض دریچه نسبت به مبدأ مختصات تعریف‌شده در پایین‌ترین تراز جعبهٔ آزمایش، متقارن است و همواره دریچه در وسط جعبه و به‌فاصلهٔ یکسان از دو بر کناری تا شانه‌ها قرار دارد. شکل(٦- الف) محور و مبدأ مختصات جعبهٔ آزمایش و شکل(٦- ب) دریچه و اندازهٔ عرض دریچه را به‌طور شماتیک نشان می‌دهند.



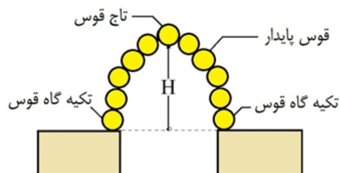
الف) نمایش دستگاه محور مختصات (x و y) و مبدأ مختصات (o) برای اندازه‌گیری موقیت ذرات مصالح دانه‌ای



ب) نمایش شماتیک دریچه و اندازهٔ عرض دریچه



پ) اندازه عرض قوس



ت) اندازهٔ ارتفاع قوس

شکل ٦ مشخصات هندسی قوس

عرض قوس. قوس تشکیل شده بر روی دریچه، مجموعه‌ای از ذرات است که شکل ظاهری آن دارای یک تاج و دو پایه یا تکیه‌گاه می‌باشد. در واقع هر یک از این دو پایه، یک دانه از قوس می‌باشد که یکی بر روی قطعهٔ افقی سمت راست و دیگری بر روی قطعه سمت چپ مجاور دریچه بازشده قرار گرفته است. مطابق شکل(٦–پ)، فاصلهٔ افقی بر تا بر این دو دانه، به‌عنوان عرض قوس در نظر گرفته می‌شود که با نماد B نشان داده می‌شود.

ارتفاع قوس. مطابق شکل(٦–ت)، قوس تشکیل شده بر روی دریچه، مجموعه‌ای از ذرات است که شکل ظاهری آن دارای یک تاج و دو پایه یا تکیه‌گاه می‌باشد. درواقع منظور از محل تاج قوس، مکان هندسی بالاترین ذره شرکت کننده در قوس می‌باشد. براساس تعریف، فاصلهٔ قائم از بر ذرهٔ واقع در تاج قوس تا مبدأ مختصات که دقیقاً در پایین‌ترین تراز جعبه و در وسط دریچه قرار گرفته است، ارتفاع قوس نامیده می شود و با نماد H نمایش داده می‌شود.

در هر گام از آزمایش، اطلاعات قرائت شده از روی قوس پایدار به‌صورت یک کد پنج کاراکتری ثبت می‌شوند. فرم کلی این کد به شکل A-θ-W-B-H است که به‌ترتیب از سمت چپ به شرح زیر قابل بیان هستند.

A بیانگر نوع مصالح دانه‌ای است که برای گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل، گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم و مجموعهٔ سنگریزه‌ها به‌ترتیب به‌صورت L، D و R می‌باشد.

θ نمایندهٔ زاویهٔ قرارگیری بستر مصالح دانه‌ای نسبت به افق برحسب درجه است.

W نشان‌دهندهٔ مقدار بازشدگی عرض دریچه برحسب سانتی‌متر است.

B نمایندهٔ عرض قوس پایدار برحسب سانتی‌متر است.

H نمایانگر ارتفاع قوس پایدار برحسب سانتی‌متر است.

به‌طور مثال، کد L-40-6.2-6.0-4.8 اطلاعات قرائت شدهٔ مربوط به قوس تشکیل‌شده در گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل، بر روی زاویهٔ بستر به اندازهٔ ٤۰ درجه با عرض دریچه معادل ٦/۲ سانتیمتر است که عرض و ارتفاع قوس به‌ترتیب ٦ و ٤/۸ سانتی‌متر می‌باشد.

نتایج حاصل از مشاهدات

براساس مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده، می‌توان نتایج متعددی را به‌صورت زیر استخراج و دلیل وقوع آنها را تفسیر نمود.

حد شروع قوس‌زدگی. در گام‌های ابتدایی آزمایش، باز شدن تدریجی دریچه و افزایش عرض آن، سبب خروج مقدار اندکی از ذرات مصالح دانه‌ای می‌شود، اما ممکن است هیچ‌گونه ساختار پایداری به شکل یک قوس بر روی دریچه ایجاد نگردد. این در حالی است که با رسیدن عرض دریچه به یک حد معین، ذرات بیشتری شروع به فرو ریختن از منفذ دریچه می‌نمایند و به این ترتیب نخستین قوس پایدار بر روی دریچه تشکیل می‌شود. به‌منظور یافتن حداقل عرض دریچه که سبب فعال شدن اثر قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای و ایجاد اولین قوس پایدار بر روی دریچه می‌شود، باتوجه به اطلاعات قرائت‌شده از هر گام آزایش می‌توان نسبت کوچک‌ترین عرض دریچه به قطر متوسط ذرات هر نوع از مصالح دانه‌ای را به‌ازای مقادیر متفاوت زاویهٔ بستر اصلی دستگاه به‌صورت زیر محاسبه نمود:

– گوی‌های پلاستیکی در هر دو آرایش شل و متراکم:

$$\frac{W_{min}}{d_{50}} = \frac{1.6\ (cm)}{1.2\ (cm)} = 1.33$$

– مجموعهٔ سنگریزه:

$$\frac{W_{min}}{d_{50}} = \frac{1.2\ (cm)}{0.9\ (cm)} = 1.33$$

با توجه به نتایج فوق، نسبت کوچک‌ترین عرض دریچه به قطر متوسط ذرات هر نوع از مصالح دانه‌ای برابر ۱/۳۳ است. این نسبت مستقل از زاویهٔ بستر اصلی

دستگاه و نوع آرایش مصالح دانه‌ای است و فقط وابسته به قطر متوسط ذرات تشکیل دهندهٔ مصالح دانه-ای می‌باشد. بنابراین اگر نسبت کوچکترین عرض دریچه به قطر متوسط مصالح دانه‌ای به‌عنوان «حد شروع قوس‌زدگی» نام‌گذاری شود، می‌توان گفت که این پارامتر همواره ثابت و برابر ۱/۳۳ است. مفهوم حد شروع قوس‌زدگی این است که به‌ازای عرض‌های کوچک‌تر از آن، هیچ قوسی در مصالح ایجاد نمی‌شود و عملکرد قوس‌زدگی پدیدار نمی‌گردد. البته برای حصول اطمینان از درستی این یافته، چندین بار مراحل ابتدایی آزمون با عرض‌های بسیار کوچک دریچه برای کلیه مصالح انجام شده است، اما همگی مشاهدات بیانگر صحت این موضوع هستند.

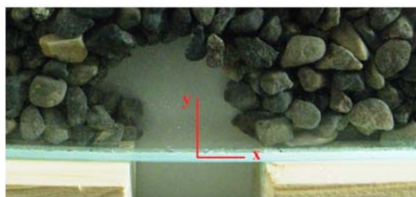
ارتباط اندازهٔ عرض قوس با عرض دریچه. شکل (۷) نمونه‌ای از تشکیل قوس پایدار بر روی دریچه و شکل (۸) رابطهٔ بین اندازهٔ عرض قوس و عرض دریچه را برای مصالح دانه‌ای مورد استفاده در این آزمایش و به‌ازای مقادیر مختلف زاویهٔ بستر دستگاه نشان می‌دهد. باید توجه داشت که قوس ایجاد شده دقیقاً بر روی دریچه ایجاد نمی‌شود و عرض قوس همواره برابر عرض دریچه نیست. مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که با افزایش عرض دریچه، به‌مقدار عرض قوس افزوده می‌گردد. دلیل این پدیده بدین صورت قابل بیان است که با هر بار باز شدن دریچه، به مصالح بیشتری نسبت به گام قبل اجازه خروج از محل دریچه داده می-شود و از طرفی قوس برای تشکیل‌شدن باید حتماً دو تکیه‌گاه خود را به‌نحوی به دو طرف دریچه اتصال دهد، بنابراین قوس ایجادشده مجبور است برای شکل-گیری به تبع دریچه، عرض خود را افزایش دهد.



الف) گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل

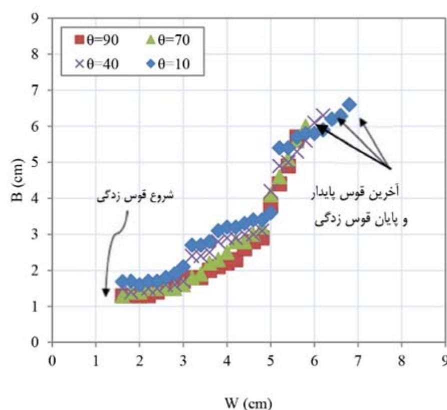


ب) گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم

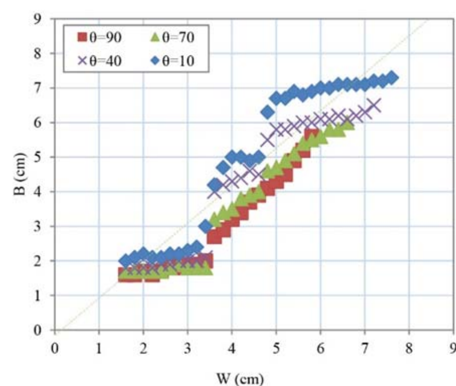


پ) مجموعهٔ سنگریزه

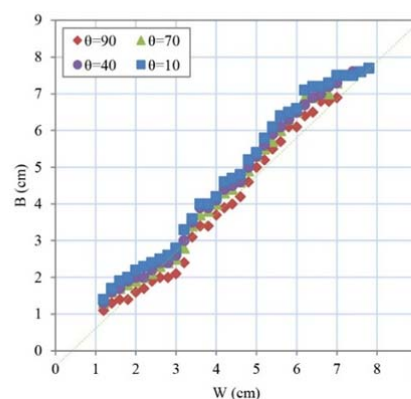
شکل ۷ تصویری از یک نمونه قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای و تشکیل قوس پایدار بر روی دریچه



الف) گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل



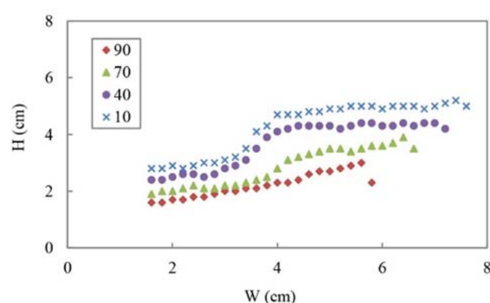
ب) گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم



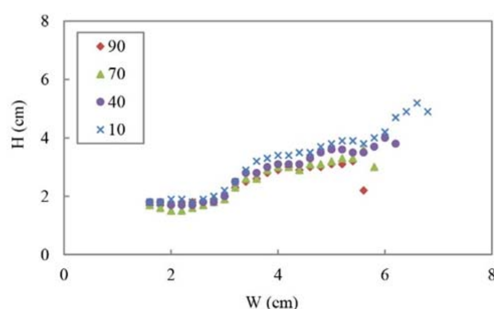
(پ) مجموعهٔ سنگریزه

شکل (۸) تغییرات عرض قوس در مقابل عرض دریچه

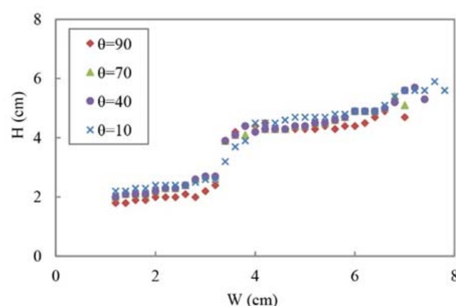
ارتباط اندازهٔ ارتفاع قوس با عرض دریچه. مشاهدات حاکی از آن هستند که محل تاج قوس معمولاً بر روی محور قائم مختصات قرار می‌گیرد. البته باید توجه داشت که برخی از موارد در رابطه با مجموعهٔ سنگریزه‌ها، مکان تاج قوس نسبت به راستای محور قائم مختصات، کمی به طرف راست یا چپ منحرف می‌شود که دلیل آن را می‌توان عدم یکنواختی و تقارن توزیع این مصالح نسبت به محور مختصات جعبه دانست. بدیهی است این عدم‌تقارن سبب می‌شود که مصالح دانه‌ای از یک طرف (به‌طور مثال از سمت چپ دریچه) با دبی بیشتری نسبت به طرف دیگر تخلیه گردد. به همین دلیل تشکیل قوس پایدار به یک سمت متمایل خواهد شد و در نتیجه تاج قوس هم به همان سمت جهت‌گیری می‌کند. شکل (۹) تغییرات ارتفاع قوس برحسب عرض دریچه را نمایش می‌دهد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با افزایش عرض دریچه به ارتفاع قوس افزوده می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان به تخلیهٔ بیشتر مصالح دانه‌ای از خروجی، با افزایش عرض دریچه نسبت داد. هر چه عرض دریچه زیادتر شود، به مصالح دانه‌ای بیشتری اجازهٔ خروج از دریچه داده می‌شود، بنابراین پایه‌هایی در فاصلهٔ بیشتری از هم قرار می‌گیرند و اثر قفل‌شدگی دانه‌ها در یکدیگر و بسیج‌شدگی تنش‌های برشی بین ذرات واقع در ترازهای بالای دریچه سبب تشکیل قوس پایدار در فاصلهٔ بیشتری از تراز دریچه می‌گردد و درنتیجه مختصات محل قرارگیری تاج و در حقیقت ارتفاع قوس افزایش می‌یابد. البته بسته به نحوهٔ قفل‌شدگی دانه‌ها در یکدیگر در حین فرایند تخلیه از دریچه، نرخ افزایش ارتفاع قوس در مقابل افزایش عرض دریچه متفاوت است. برای کلیهٔ مصالح دانه‌ای آزمایش شده در این پژوهش، مشاهدات صورت گرفته نشان می‌دهند که ارتفاع قوس با عرض دریچه رابطه‌ای مستقیم دارد و روند تغییرات آن برای تمامی این مصالح مشابه یکدیگر است.



(الف) گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم



(ب) گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل



(پ) مجموعهٔ سنگریزه

شکل ۹ تغییرات ارتفاع قوس در مقابل عرض دریچه

مطابق شکل (۹)، افزایش در زاویهٔ قرارگیری بستر مصالح نسبت به افق سبب کاهش ارتفاع قوس شده است. با افزایش زاویه بستر مصالح نسبت به افق، مؤلفهٔ شتاب ثقل مؤثر ($g \times \sin\theta$) اعمال‌شده بر مصالح افزایش می‌یابد و درنتیجه مقدار فشار سربار ($\gamma \times z$) موجود بر روی قوس ایجادشده بیشتر $((\rho g \times \sin\theta) \times z)$ می‌شود. بنابراین، به قوس تشکیل-شده فشار بیشتری اعمال می‌شود و از این‌رو، ابعاد آن کوچک‌تر خواهد گردید. به عبارت دیگر، برای دو زاویهٔ مختلف، همواره قوسی با ابعاد بزرگ‌تر بر روی زاویهٔ کوچک‌تر تشکیل می‌شود. همان‌طور که بیان گردید، با افزایش اندازهٔ دریچه، ارتفاع قوس پایدار تشکیل‌شده افزایش می‌یابد، اما نکتهٔ قابل توجه آن است که این روند افزایشی تا انتهای آزمون یعنی انهدام قوس انجام نمی‌شود و آخرین قوس پایدار تشکیل شده بر روی دریچه دارای بیشینه اندازهٔ ارتفاع نمی‌باشد، بلکه دقیقاً در آستانهٔ انهدام، یعنی یک گام پیش از فروپاشی قوس، ارتفاع قوس نسبت به گام قبل اندکی کاهش می‌یابد (شکل ۹). علت این مسأله را می‌توان این‌گونه بیان نمود که باتوجه به افزایش عرض دریچه و درنتیجهٔ آن افزایش عرض قوس، از یک‌سو مصالح بیشتری میل به خروج از دریچه را پیدا می‌کنند، و از سوی دیگر قابلیت تحمل فشار قوس دقیقاً در لحظهٔ قبل از انهدام کامل، تقلیل می‌یابد و بنابراین تغییرمکان قائم (رو به پایین) تاج افزایش می‌یابد. از این‌رو، قوس مجبور است برای تحمل فشار وارد شده ارتفاع خود را کم کند (شکل ۹).

این پدیده یافته‌ای جدید است که از نتایج این پژوهش به‌دست آمده است. مقایسهٔ نتایج ارائه‌شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که به ازای تمامی مقادیر زاویهٔ بستر، مقدار افت در ارتفاع آخرین قوس پایدار با قطر متوسط دانه‌ها رابطهٔ مستقیم و با زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای رابطهٔ عکس دارد. یعنی افت ارتفاع در آخرین قوس، برای سنگریزه‌ها با قطر متوسط ۹ میلی-متر کوچک‌تر از گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم و شل با قطر متوسط ۱۲ میلی‌متر است. از طرفی با وجود تساوی قطر متوسط گوی‌های پلاستیکی، مقدار افت ارتفاع آخرین قوس در آرایش متراکم($\phi = 37.4^\circ$) نسبت به آرایش شل ($\phi = 30.7^\circ$) اندکی کمتر است.

شکل هندسی منطقهٔ قوس‌زدگی. شکل (۱۰) مکان هندسی ذرات تشکیل‌دهندهٔ قوس را به‌ازای عرض دریچه به اندازهٔ ۲/۸ و ۵/٦ سانتی‌متر و زاویهٔ بستر ٤۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. در شکل (۱۰) منظور از W و θ به‌ترتیب عرض دریچه و زاویهٔ بستر مصالح نسبت به افق و x و y نمایانگر مکان هندسی نقاط واقع در قوس نسبت به مبدأ مختصات می‌باشد. بررسی دقیق شکل ۱۰

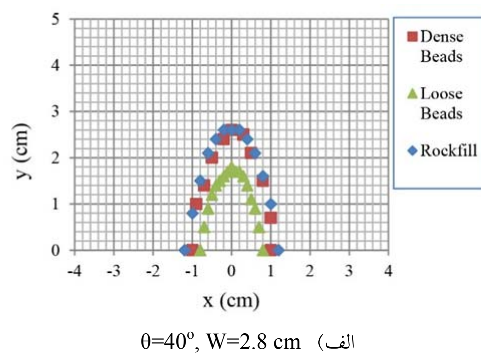
می‌تواند به‌منظور مقایسهٔ اثر هم‌زمان عرض دریچه و زاویهٔ بستر مصالح بر روی شکل هندسی و ابعاد قوس تشکیل‌شده به‌کار رود. با دقت در هندسهٔ قوس‌های تشکیل شده می‌توان با تخمین بسیار خوبی گفت که شکل هر قوس از یک سهمی به معادلهٔ زیر تبعیت می-کند:

$$y = H \cdot \left[1 - \left(\frac{2\,x}{B} \right)^2 \right] \quad (۱)$$

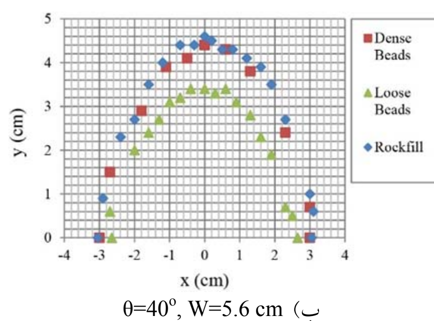
در این رابطه
B عرض قوس، H ارتفاع قوس، X و y طول و عرض مکان هندسی نقاط تشکیل‌دهندهٔ قوس نسبت به مبدأ مختصات می‌باشند.

به بیان دیگر، شکل هندسی منطقه تحت تأثیر عملکرد قوس‌زدگی به‌صورت یک سهمی است. دانستن شکل ناحیهٔ قوس‌زدگی نقش بسزایی در به‌کار گیری نوع فرضیات و انتخاب روش‌های مورد نیاز به‌منظور بررسی و تحلیل تنش - کرنش و روابط حاکم بر زنجیرهٔ نیرویی موجود در قوس برای شناخت سازوکار انتقال بار ناشی از پدیدهٔ قوس‌زدگی ایفا می‌کند. براساس این یافته می‌توان گفت که اگر یک بازشو با

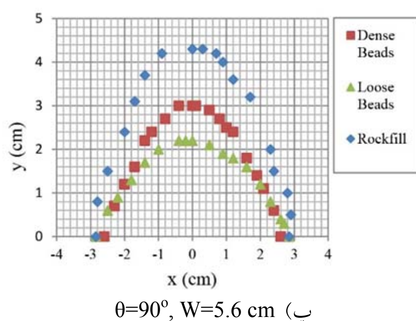
شکل هندسی یک سهمی در مصالح دانه‌ای نظیر یک تونل یا حفره در خاک ماسه‌ای حفر شود، به شرط آن که عرض و ارتفاع آن در رابطهٔ (۱) صدق کند، به سبب پدیدهٔ قوس‌زدگی این تونل یا حفره می‌تواند بدون حایل‌بندی کاملاً پایدار باقی بماند. البته توجه به این نکته ضروری است که این ادعا فقط برای مدل‌سازی تونل در شرایط محیط این آزمایش (یعنی ابعاد دستگاه توسعه یافتهٔ دریچه، مقدار مجاز مصالح دانه‌ای بر روی قوس ایجاد شده و برقراری شرایط کرنش مستوی) اعتبار دارد. از سوی دیگر، شکل (۱۰) اثر اندازهٔ عرض دریچه و زاویهٔ بستر مصالح دانه‌ای نسبت به افق را هم بر روی عرض و ارتفاع قوس تشکیل‌شده نشان می‌دهد. مطابق مشاهدات انجام شده با افزایش اندازهٔ عرض دریچه، عرض قوس ایجاد شده نیز بیشتر خواهد شد. دلیل این امر آن است که با افزایش عرض دریچه مصالح بیشتری تخلیه می‌گردند و از آن‌جا که قوس روی دریچه تشکیل می‌شود، الزاماً عرض آن باید افزایش یابد. هم‌چنین بزرگ‌ترین قوس در سنگریزه‌ها ($\varphi=41.3^o$) و کوچک‌ترین قوس در گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل ($\varphi=30.7^o$) ایجاد شده است. این در حالی است که قطر گوی‌های پلاستیکی در هر دو آرایش یکسان ($d=12mm$) و بزرگ‌تر از اندازهٔ قطر متوسط سنگریزه‌ها ($d_{50}=9mm$) است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد قوس تشکیل شده دارای رابطه‌ای مستقیم با تراکم و زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای است.



الف) $\theta=40^o$, W=2.8 cm



ب) $\theta=40^o$, W=5.6 cm



پ) $\theta=90^o$, W=5.6 cm

شکل ۱۰ مقایسهٔ شکل قوس تشکیل شده بر روی دو عرض دریچه و دو زاویهٔ بستر معین

نتیجه‌گیری

بررسی ماهیت قوس‌زدگی به‌معنای تشکیل یک قوس پایدار در مصالح دانه‌ای موضوعی قابل توجه است. یافتن عوامل مؤثر در نحوهٔ شکل‌گیری و مشخصات فیزیکی این قوس شامل عرض و ارتفاع آن می‌تواند به درک جامع‌تر ساز وکار قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای فاقد چسبندگی کمک کند. به همین منظور یک دستگاه توسعه یافتهٔ دریچه با قابلیت دریچه و بستر متحرک ساخته شد و به‌کمک آن ابعاد قوس ایجاد شده در مصالح دانه‌ای برحسب زاویهٔ اصطکاک داخلی، قطر متوسط و زاویه قرارگیری بستر مصالح مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهدات آزمایشگاهی نشان دادند که برای همهٔ مصالح دانه‌ای مورد آزمایش با افزایش عرض دریچه و کاهش زاویهٔ بستر اصلی دستگاه، عرض و ارتفاع قوس تشکیل شده افزایش می‌یابد. از طرفی، شکل تمامی قوس‌ها که در واقع نمایانگر شکل هندسی

ناحیهٔ تحت اثر قوس‌زدگی است با تقریب بسیار خوبی از رابطهٔ یک سهمی تبعیت می‌کند. علاوه بر این، به‌ازای یک اندازه عرض دریچه و زاویهٔ بستر ثابت، با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی و چگالی مصالح دانه‌ای، ارتفاع و عرض قوس افزایش می‌یابد.

قدردانی

از مشاورهٔ ارزندهٔ جناب آقای دکتر جعفر بلوری بزاز در خصوص طراحی جزئیات دستگاه توسعه‌یافتـهٔ دریچـه صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. هم‌چنین، از جناب آقای دکتر محمّد غفوری که در رفع اشکالات موجود و نحوهٔ تفسیر نتایج آزمایشگاهی سهم بسزایی داشته‌اند، به‌طـور ویژه تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. Terzaghi, K., "*Theoretical Soil Mechanics*." *J. Wiley and Sons*, Inc. 510, (1943): pp. 510
2. Jiang, Y.-J., Towhata," Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact Behavior Against a Rigid Retaining Wall*", Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp. 1-17, (2012).
3. Akbarzadeh, H., A. Bayat, *"Investigating ASTM F 1962 Arching Factor for Polyethylene Pipes Installed by Horizontal Directional Drilling",* Tunnelling and Underground Space Technology, (2012).
4. Chen, C.N., W.-Y. Huang, and C.-T. Tseng," Stress Redistribution and Ground Arch Development during Tunneling*", Tunnelling and Underground Space Technology*,NO 26(1), pp. 228-235, (2011).
5. Chen, R.P., et al.," Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method", *Computers and Geotechnics*, NO 38(2), pp. 187-195, (2011)
6. Chen, R.p., et al., "Experimental Study on Face Instability of Shield Tunnel in Sand", *Tunnelling and Underground Space Technology*, No 33(0), PP. 12-21, (2013).
7. Lee, C.J., et al., "Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil", *Tunnelling and Underground Space Technology*, No 21(2), pp. 119-132, (2006).
8. Kahyaoglu, M., et al., "Numerical Analyses of Piles Subjected to Lateral Soil Movement", KSCE Journal of Civil Engineering, No 16(4),pp. 562-570, (2012).
9. Eekelen, S.J.M., et al., "Model Experiments on Piled Embankments". *Part II. Geotextiles and Geomembranes*,No 32(0), pp. 82-94, (2012).
10. Karinski, Y.S., A.N. Dancygier. and I. Leviathan, "An Analytical Model to Evalulate the Static Soil Pressure on a Puried Structure*". Engineering Structures*, No 25(1), pp. 91-101, (2003).
11. Huang, Z., E. Broch. and M. Lu, *"*Cavern roof stability—mechanism of arching and stabilization by rockbolting*". Tunnelling and Underground Space Technology*, No.17(3), pp. 249-261, (2002).

12. Sargand, S., T. Masada, "Soil Arching over Deeply Buried Thermoplastic Pipe", Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, No 1849(-1), pp. 109-123, (2003).

13. Roberts, A.W., "Review of Mass-flow Hopper Design with Respect to Stress Fields and Surcharge Loads". *Particuology*, No 8(6), pp. 591-594, (2010).

14. Tien , H.-J.,"A Literature Study of the Arching Effect", Massachusetts Institute Of Technology. pp. 196, (1996).

15. Guo., Zhou, "Arch in Granular Materials as a Free Surface Problem". *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, (2012).

16. Terzaghi, K., "Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand Above a Yielding Trap-Door. in First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", Cambridge, Massachusetts,(1936).

17. ASTM Standard C1444-00," Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders ASTM International", West Conshohocken, PA, (2005).